Vol.14, No.2, Summer 2025, p. 1-20 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076



Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/geoeh.2025.91689.1542 OPEN ACCESS

Analysis of the Location of the Subtropical Jet Stream and Synoptic Conditions Affecting Wet Year in the Northeastern of Iran

Homa Dorostkar Golkhaili [1], **Hasan Lashkari** [2], **Zainab Mohammadi** [3]

[1] PhD Student of Climatology, Department of Physical Geography, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
[2] Professor in Climatology, Department of Physical Geography, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
[3] Postdoctoral in Synoptic Climatology, Department of Physical Geography, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received:19 January 2025

Revise Date: 11 May 2025

Accepted: 15 May 2025

Available Online: 17 May 2025

Keywords:

Subtropical Jet Stream
Jet Stream Positioning
Synoptic Climatology
Extreme Precipitation Events
Northeastern of Iran

ABSTRACT

Subtropical jet streams are crucial upper-tropospheric synoptic systems that play a significant role in shaping regional precipitation through large-scale moisture transport and dynamic forcing. This study investigates the spatial characteristics, positioning, and elongation patterns of the subtropical jet stream during extremely wet years in northeastern Iran. Daily precipitation data from meteorological stations across North Khorasan and Razavi Khorasan provinces over a 33-year period, covering solar cycles 22 to 24, were used to identify extreme wet years based on the Standardized Precipitation Index (SPI) and DIP software. Upper-air variables, including zonal and meridional wind components, specific humidity, and vertical velocity (omega) at the 1000–500 hPa levels, were retrieved from the NCEP/NCAR and ECMWF reanalysis datasets. The findings indicate that during intense rainfall episodes, the jet stream core frequently shifts northward beyond 33°N latitude, enhancing atmospheric instability and promoting widespread precipitation. The most favorable jet core position is located between western Iran, the southern Caspian Sea, and the Semnan province. Additionally, among the dominant synoptic patterns identified, the Sudan Low was found to be the most frequent and influential system contributing to increased precipitation. These results underscore the dynamic influence of upper-level circulation patterns on the hydroclimate variability of northeastern Iran.

* Corresponding author: Dr. Hasan Lashkari E-mail address: h-lashkari@sbu.ac.ir

How to cite this article: Dorostkar Golkhaili, H., Lashkari, H., & Mohammadi**,** Z. (2025). Analysis of the Location of the Subtropical Jet Stream and Synoptic Conditions Affecting Wet Year in the Northeastern of Iran. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *14*(2), 1-20. https://doi.org/10.22067/geoeh.2025.91689.1542

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The jet core is one of the most important factors in dynamic ascent; the position of the subtropical jet stream regulates and transforms atmospheric flows at all levels between the tropics and extratropics. The jet stream, which generally forms in the higher levels of the troposphere, plays a fundamental role in controlling the path of rain-producing systems, the timing of their entry and exit, determining precipitation periods, and influencing seasonal changes due to the intensification of divergence and convergence at its lower levels. Therefore, studying the behavior of the jet stream and determining the dominant synoptic pattern or patterns in extremely wet years is of particular importance for the proper management of water resources and the identification or prediction of possible risks, losses, and damages caused by floods.
Regarding the research topic, studies have been conducted on pressure systems or precipitation-generating systems in northeastern Iran, but no comprehensive research has been conducted on the location of the jet stream's establishment in relation to the creation of wet year conditions in this region, or on the dominant synoptic patterns responsible for creating the above conditions, which we address in this research. The aim of the present study is to determine the best location and elongation pattern of the subtropical jet under wet year conditions and to identify the dominant synoptic patterns in northeastern Iran.

Material and Methods

This research takes an environmental approach to circulation. In this regard, synoptic stations in northeastern Iran were selected for study over a 33-year statistical period (1986–2019), corresponding to the three most recent solar cycles (1986–1997; 1997–2008; 2008–2019). In the next step, precipitation data from the selected stations were obtained from the Meteorological Organization of Iran. Then, by using the SPI index with categories ranging from humid to extremely humid, and using DIP software, severely wet years in the region were determined.
The wet years identified are as follows:

- First cycle: 1991–1992 and 1992–1993
- Second cycle: 1997–1998
- Third cycle: 2018–2019

Next, heavy and extremely heavy rainfall days were identified at the stations in the region. Out of the total rainfall days in northeastern Iran during the statistical interval, days equal to or above the 50th percentile were considered as heavy rainfall days. Atmospheric data for these days—including the zonal wind component, meridional wind component, geopotential height at 250 hPa, sea-level pressure (SLP), specific humidity, and omega—were retrieved from the NCEP/NCAR and ECMWF websites for the 1000, 925, 850, 700, and 500 hPa levels, across the region spanning 0° to 100° east longitude and 0° to 65° north latitude. To identify the most frequent jet stream pattern, a factor analysis, KMO criterion, and Bartlett's test were conducted using SPSS24 software.

Results and Discussion

In this study, the spatial and temporal location of the zonal jet in northeastern Iran was investigated across three solar cycles (22, 23, and 24) at the 250 hPa level. On all days when heavy rainfall was recorded at the regional stations, the subtropical jet stream was observed at either lower southern latitudes or higher northern latitudes, sometimes extending over the northern half of Iran.
During the most severe wet years, the jet core locations were found within 48° to 60° east longitude and 33° to 40° north latitude—directly over the study area. The jet cores were concentrated and coherent, which had a significant impact on precipitation. The jet axes during these years were short, entirely meridional, and stretched from the Persian Gulf to Central Asia.
In the analysis of synoptic patterns, the Sudan low-pressure system emerged as the most influential in the severe wet years of northeastern Iran. This system was typically located in the lower troposphere, moving

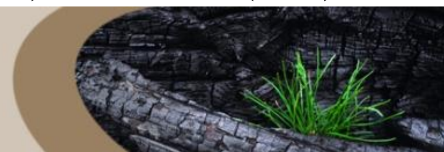
in a southwest–northeast direction over eastern and northeastern Iran. Simultaneously, the African High was positioned over the Mediterranean Sea, and cold advection from northern latitudes behind the Sudan system increased the temperature gradient on its western slope.

Moreover, the Tibetan High, extending over the warm Oman and Arabian seas, transported moisture from these sources into the Sudan system and subsequently toward northeastern Iran. At the 700 hPa level and above, a deep trough extending from northwest Iran to the southern Arabian Peninsula placed northeastern Iran on its right flank, enhancing precipitation. At the same time, the Arabian High, positioned over the Arabian Sea, further contributed to moisture transport through circulation ahead of the trough.

Conclusion

The results of this study showed that on the most intense rainy days in the region, the subtropical jet stream was often located above 33°N latitude and contributed to intense and widespread rainfall. The optimal position for the central cores of the subtropical jet, to create wet year conditions in northeastern Iran, lies between the western part of Iran, the southern Caspian Sea, and Semnan Province. Additionally, among the dominant synoptic patterns identified, the Sudan low-pressure system was the most frequent and influential pattern under extremely wet year conditions and had the greatest impact on rainfall in the region.

جلد ۱۴، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۴، ص ۲۰-۱ ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076



نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی



مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/geoeh.2025.91689.1542 دسترسی آزاد

واکاوی موقعیت مکانی رودباد جنب‌حاره و شرایط همدید مؤثر بر ترسالی‌های شدید شمال‌شرق ایران

هما درستکار گل‌خیلی [1]، حسن لشکری [2*]، زینب محمدی [3]

[1] دانشجوی دکتری اقلیم شناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
[2*] استاد اقلیم شناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
[3] پسادکتری اقلیم‌شناسی سینوپتیک، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۳۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۵

کلمات کلیدی:

رودباد جنب حاره

موقعیت‌یابی رودباد جنب‌حاره

اقلیم‌شناسی همدیدی

رخدادهای بارشی حدی

شمال‌شرق ایران

چکیده

رودباد جنب‌حاره‌ای از مهم‌ترین سامانه‌های سینوپتیکی تراز فوقانی وردسپهر است که از طریق انتقال رطوبت در مقیاس بزرگ و تحریک دینامیکی، نقش مهمی در شکل‌دهی به الگوهای بارشی مناطق مختلف ایفا می‌کند. این پژوهش به بررسی ویژگی‌های مکانی، موقعیت استقرار و الگوی کشیدگی رودباد جنب‌حاره‌ای در سال‌های ترسالی شدید شمال‌شرق ایران پرداخته است. داده‌های بارش روزانه ایستگاه‌های استان‌های خراسان شمالی و رضوی در یک دوره آماری ۳۳ ساله، منطبق با چرخه‌های خورشیدی ۲۲ تا ۲۴، برای شناسایی سال‌های ترسالی شدید با استفاده از شاخص SPI و نرم‌افزار DIP به‌کار رفت. متغیرهای جوی تراز فوقانی شامل مؤلفه‌های باد مداری و نصف‌النهاری، نم ویژه و سرعت قائم (امگا) در ترازهای ۱۰۰۰ تا ۵۰۰ هکتوپاسکال از داده‌های بازتحلیل NCEP/NCAR و ECMWF استخراج شد. نتایج نشان داد که در دوره‌های بارش شدید، هسته رودباد اغلب به عرض‌های شمالی‌تر از ۳۳ درجه جابجا شده، ناپایداری جو را افزایش داده و موجب بارش گسترده می‌شود. موقعیت مطلوب هسته رودباد، منطقه‌ای بین غرب ایران، جنوب دریای خزر و استان سمنان است. همچنین، کم‌فشار سودان پرتکرارترین و مؤثرترین الگوی همدیدی مرتبط با افزایش بارش شناسایی شد. این نتایج نقش مؤثر الگوهای چرخش تراز بالا در تغییرپذیری اقلیم هیدرولوژیکی منطقه را نشان می‌دهد.

* نویسنده مسئول: دکتر حسن لشکری E-mail address: h-lashkari@sbu.ac.ir

مقدمه

بروز ترسالی به عنوان یک ناهنجاری جوی، از جمله پدیده‌های طبیعی و فرین‌های اقلیمی است که ریشه در تغییرپذیری اقلیم از جمله گردش عمومی جو دارد. شناخت دقیق سازوکار و نحوه‌ی عمل الگوی گردش جوی و عناصر مؤثر در وقوع بارش‌های حدی، از اهمیت زیادی برخوردار است، از این جهت که بارش‌های شدید می‌تواند مسبب رخداد سیل و عواقب مصیبت بار پس از آن باشد. بارش تنها یک فرآیند حیاتی در چرخه‌ی هیدرولوژی جهانی نیست بلکه شاخص مهمی از تغییرات اقلیمی به‌شمار می‌رود (Fu et al., 2016). بارش از عناصر اقلیمی پیچیده در زمان و مکان است و الگوی آشفته‌ای دارد (Tan, Gan, Chen & Liu, 2019) و از این جهت در کشور ایران نیز، از تنوع زمانی و مکانی قابل ملاحظه‌ای برخوردار است. با توجه به ارتباط نزدیکی که بین الگوهای گردش جوی و عناصر اقلیمی وجود دارد، می‌توان پدیده‌های فرین اقلیمی، مانند سیل و ترسالی‌ها را به تغییراتی که در الگوهای گردش جوی به وجود می‌آید، نسبت داد (Babaee & Fattahi, 2014). یکی از سیستم‌های سینوپتیک که موقعیت، شرایط استقرار و ویژگی‌های دینامیکی آنها در وضعیت اقلیم یک منطقه و ایجاد شرایط ترسالی و یا خشکسالی هر منطقه، اثرگذار می‌باشد، رودبادها به ویژه رودباد جنب‌حاره هستند. با بررسی و شناسایی فعل و انفعالات ترازهای فوقانی وردسپهر به خصوص رودبادها و بطور أخص رودباد جنب‌حاره‌ای و نوسانات دوره‌ای و موقعیت آن در دوره‌های ترسالی و خشکسالی، می‌توان اثرات مثبت و منفی آن‌ها را در هر سال را قضاوت کرد. پژوهش‌های متعددی در سطح جهان و ایران انجام شده است که نشان داده‌اند موقعیت مکانی – زمانی رودبادهای جنب‌حاره بر اغلب ترسالی‌ها اثرگذار هستند.

از مطالعاتی که در این زمینه انجام شده است، می‌توان به بررسی‌های دگیرمندزیک و ویبگ (Degirmendžić & Wibig, 2007)، سیدل و همکاران (Seidel, Fu, Randel & Reichler, 2008)، آرچر و کالدریا (Archer & Caldeira1, 2008)، هادسن (Hudson, 2012)، آبیش و همکاران (Abish, Joseph & Johannessen, 2015) اشاره کرد. هورینوچی و هایاشی (Horinouchi & Hayashi, 2017) رابطه بین موقعیت رودباد جنب‌حاره‌ای با بارش تابستانه در شرق آسیا را مطالعه کرده و نشان دادند که بارش‌ها در فصل تابستان، بر فراز مناطق ساحلی شرق چین که با رودبادهای لحظه‌ای همراه است، بیشتر است.

یوکویاما و همکاران (Yokoyama, Takayabu & Horinouchi, 2017) دریافتند که رودباد جنب‌حاره محیط‌های مطلوبی را برای سیستم‌های بارشی سازمان‌یافته بر روی شرق آسیا تا شمال غربی اقیانوس آرام معروف به باند باران[1] تولید می‌کند. زولوتو و همکاران (Zolotov, Ippolitov & Loginov, 2018) در بررسی موقعیت جریان رودباد جنب‌حاره در طول دوره‌ی ۶۰ ساله (۱۹۵۸-۲۰۱۷) بر فراز اقیانوس اطلس شمالی، نشان دادند که رودباد جنب‌حاره در طی دوره‌ی آماری، با یک درجه جابه‌جایی به سمت قطب در فصل تابستان، سرعت آن ۱ متر بر ثانیه افزایش داشته است؛ در حالی‌که با جابه‌جایی به سمت استوا در فصل زمستان، سرعت آن ۳ متر بر ثانیه افرایش یافت. اسیری و همکاران (Asiri, Almazroui & Awad, 2020) نشان دادند که جریان رودبادی در بیش از ٪۸۷ مواقع در سطح فشار ۲۰۰ هکتوپاسکال واقع شده است. هانت و زاز (Hunt & Zaz, 2023) در بررسی ارتباط نوسانات اقیانوس اطلس شمالی با بارش زمستانی بر فراز هیمالایای غربی از طریق ناهنجاری‌های جریان رودبادی جنب‌حاره مورد نشان دادند که در طول مراحل مثبت نوسان اقیانوس اطلس شمالی (NAO+)، تغییرات سرعت رودباد جنب‌حاره٪۲۰ رایج‌تر و ٪۷ شدیدتر از فازهای منفی (NAO-) است. علیجانی و همکاران (Alijani, Khosravi & Esmailnejad, 2011) در تحلیل همدید بارش سنگین جنوب‌شرق ایران نشان دادند که وجود رطوبت زیاد در تراز پایین جو بخصوص تخلیه رطوبتی شدید از خلیج فارس، ناهنجاری‌های منفی شدید در ترازهای میانی جو و استقرار رودباد جنب حاره‌ای در غرب منطقه، در این رخداد نقش بسزایی داشتند. عزیزی و همکاران (Azizi, Nayeri & Rostami Jalilian, 2009) در تحلیل سینوپتیکی بارش سنگین در منطقه غرب کشور نشان دادند که سیستم کم فشار دریای مدیترانه

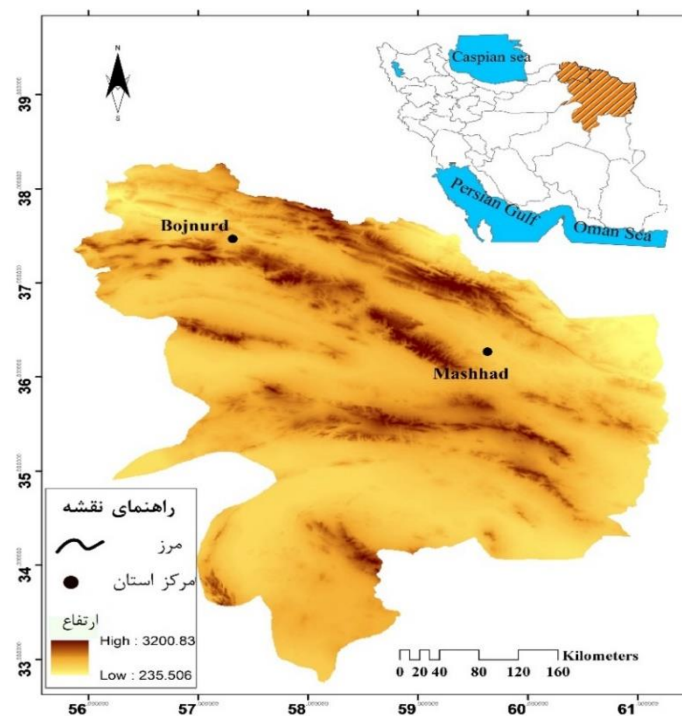
1- Rainband

و زبانه‌ی کم فشار سودانی در بارندگی‌های منطقه نقش داشته‌اند. ابراهیمی‌نیک (Ebrahimi Nick, 2012) در یکی از نتایج خود، بهترین ارتفاع مؤثر رودباد را ترازهای ۳۰۰ تا ۲۰۰ هکتوپاسکال شناسایی کرد. دارند (Darand, 2015) در بررسی و واکاوی بسامد رخداد رودبادها هنگام بارش‌های سیل‌آسای استان کردستان نشان داد که به هنگام رخداد بارش‌های سنگین در فصل مرطوب، بیشترین شار همگرایی رطوبت در ترازهای زیرین جو ۱۰۰۰، ۹۲۵ و ۸۵۰ هکتوپاسکال رخ داده است. روشن و قانقرمه (Roshan & Ghanghermeh, 2015) دریافتند که دو مؤلفه سرعت رودباد و موقعیت مرکزی هسته، نقش مؤثرتری نسبت به سرعت جابه‌جایی شمالی- جنوبی هسته بر کنترل بارش‌های ایران دارند. محمدی و لشکری (Mohammadi & Lashkari, 2018) دریافتند که مناسب‌ترین موقعیت رودباد جنب‌حاره‌ای را برای تشدید ناپایداری‌های منطقه جنوب و جنوب‌غرب ایران، لایه‌ی زیرین، محدوده‌ای بین مصر تا غرب خلیج فارس می‌باشد. زکی‌زاده و همکاران (Zaki Zadeh, Saligheh, Nasserzad & Akbari, 2018) نشان دادند که استقرار رودباد قوی با سرعت ۶۵ متر بر ثانیه در تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال در جنوب ایران به همراه ناوه سرد چالی بر روی دریای خزر، موجب ریزش باران فراگیر در ایران شده است. محمدی و همکاران (Mohammadi, Alijani & Omar Saleh, 2019) در بررسی اقلیم‌شناسی رودبادها در خاورمیانه دریافتند که از نظر زمانی و مکانی تغییرات زیادی در فراوانی و سرعت رودبادها در طول سال به وجود می‌آید. به طوری‌که در دوره‌ی سرد سال فراوانی رودبادها و سرعت آن‌ها در عرض‌های جغرافیایی ۲۰ تا ۳۰ درجه‌ی شمالی بیشینه است و در دوره‌ی گرم فراوانی و سرعت آن‌ها در مناطق ذکر شده کاهش یافته و به عرض‌های ۳۵ تا ۴۵ درجه‌ی عرض شمالی منتقل می‌شوند. سینائی و همکاران (Sinaei, Saligheh & Akbari, 2022) نشان دادند که عامل اصلی ناپایداری بارش‌های حدی جنوب‌غرب کشور رودباد جنب‌حاره است و دریاهای سرخ، عمان، عرب و خلیج فارس نقش مهمی در تامین رطوبت بارش‌های منطقه داشتند. در نتایج بدست آمده از پژوهش کیخسروی و همکاران (Keikhosravi, Shakiba & Hamidpour, 2022)، مناسب‌ترین موقعیت هسته رودباد جنب‌حاره برای ایجاد بارش‌های فوق سنگین در حوضه‌ی کرخه، در مرکز کشور عربستان است. درستکار و همکاران (Dorostkar, Lashkari & Mohammadi) در بررسی نقش رودباد جنب‌حاره‌ای در ترسالی‌های جنوب غرب ایران دریافتند که جریان رودبادی جنب‌حاره با گرایشی نصف‌النهاری سبب تزریق تاوایی مناسب به سامانه‌های بارشی وارد شده به منطقه شده است. بنی نعیمه و همکاران (Bani Naeimeh, Lashkari, Ghorbanian & Morshedi, 2023) نشان دادند که گسترش ناوه عمیق در لایه میانی وردسپهر بر روی غرب آسیا و انطباق این ناوه با رودباد جنب‌حاره در لایه بالایی وردسپهر، سبب ناپایداری‌های شدید در حوزه آبریز دز شده است. در زمینه تأثیرات موقعیت استقرار جریان رودبادی جنب‌حاره بر ایجاد شرایط ترسالی در شمال شرق ایران و همچنین الگوهای همدیدی غالب در ایجاد شرایط فوق، پژوهش جامعی صورت نگرفته است. از این جهت، هدف این مطالعه، تعیین بهترین موقعیت استقرار و الگوی کشیدگی رودباد جنب حاره‌ای در شرایط ترسالی و مشخص کردن الگو یا الگوهای همدیدی غالب در چنین شرایطی در شمال‌شرق ایران می‌باشد.

منطقه مورد مطالعه

محدوده‌ی مطالعاتی این پژوهش مشتمل بر دو استان خراسان شمالی و خراسان رضوی می‌باشد که در محدوده‌ی عرض ۳۰ درجه و ۲۴ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۱۷ دقیقه شمالی و طول ۵۵ درجه و ۲۸ دقیقه تا ۶۱ درجه و ۳۰ دقیقه شرقی واقع شده است. این منطقه از کشور، بی‌نظمی زیادی در توزیع بارش دارد. توزیع ناهمگن بارش از نظر زمانی، مکانی و مقدار در ایستگاه‌های منطقه به چشم می‌خورد. از نظر توزیع زمانی، بیشترین میزان بارش مؤثر در منطقه‌ی شمال‌شرق ایران در انتهای فصل زمستان و آغاز فصل بهار در گستره‌ی ماه‌های مارس، آوریل و می رخ می‌دهد (Ahmadi & Fallah Qalheri, 2015). شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، پست‌ترین نقطه دارای ارتفاع ۲۳۸ متر و مرتفع‌ترین مناطق دارای ارتفاع ۳۳۰۵ متر می‌باشند. در شمال‌شرق ایران، بی‌نظمی زیادی از نظر توزیع زمانی، مکانی و مقدار در بارش وجود دارد. از نظر توزیع زمانی، بیشترین میزان بارش مؤثر در منطقه‌ی شمال‌شرق ایران در انتهای فصل زمستان و آغاز فصل بهار در گستره‌ی ماه‌های

مارس، آوریل و می رخ می‌دهد (Ahmadi & Fallah Qalheri, 2015). ایستگاه‌های قوچان و بجنورد با بیشترین تعداد روزهای تر همراه با بارش سنگین، پرباران‌ترین ایستگاه‌ها و ایستگاه سبزوار با کمترین تعداد روزهای تر توأم با بارش سنگین، به عنوان کم‌باران‌ترین ایستگاه در منطقه شناسایی شدند (Bijandi, Daryabari, Ranjbar Saadat Abadi & Arbabisabzevari, 2022).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه شمال‌شرق ایران

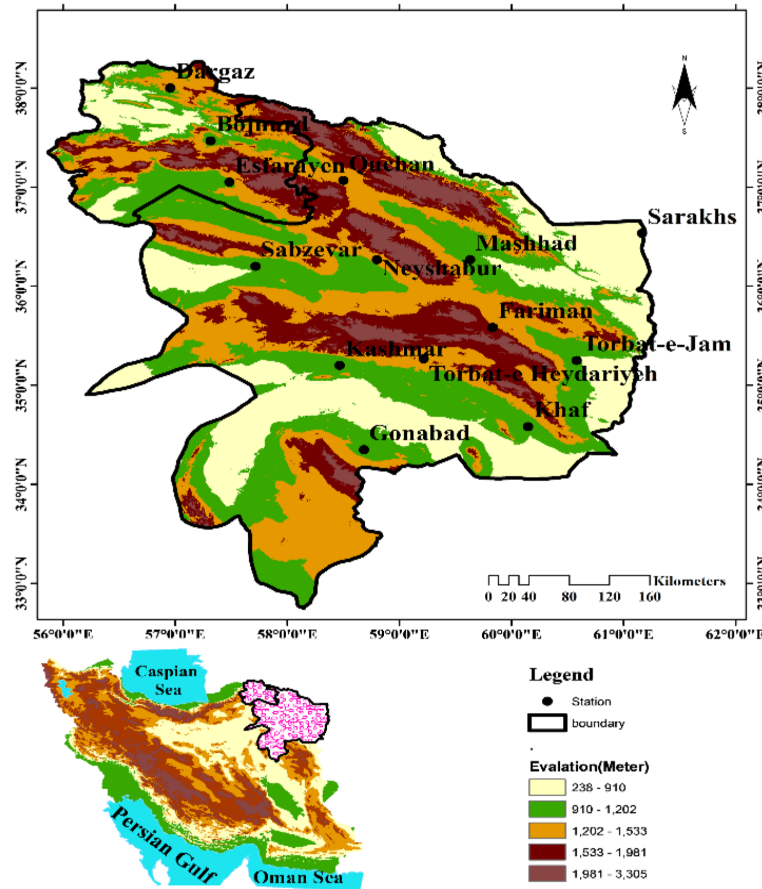
Fig. 1. Geographical Location the northeastern region of Iran

مواد و روش

برای انجام این پژوهش، ایستگاه‌های همدید منطقه‌ی شمال‌شرق ایران مشتمل بر استان‌های خراسان شمالی و خراسان رضوی که در سه چرخه خورشیدی اخیر مشتمل بر چرخه ۲۲ (سال‌های ۱۹۸۶-۱۹۹۶) چرخه خورشیدی ۲۳ (سال‌های ۱۹۹۷-۲۰۰۷) و چرخه خورشیدی ۲۴ (سال‌های ۲۰۰۸-۲۰۱۹) دارای داده‌های بارشی کامل بوده‌اند، انتخاب گردیده است. داده‌های بارش روزانه این ایستگاه‌ها از سازمان آب و هواشناسی کشور دریافت گردید. برای این که از بیشترین تعداد ایستگاه همدیدی برای استخراج ترسالی‌ها و خشکسالی‌ها و سامانه‌های بارشی استفاده شود، در هر چرخه خورشیدی یک ایستگاه، که دارای آمار ثبت شده کامل بود به عنوان یک ایستگاه عضو انتخاب گردید. به همین دلیل تعداد ایستگاه‌های عضو از چرخه اول تا چرخه سوم متفاوت بوده و افزایش یافته است. هدف از انتخاب سه چرخه خورشیدی اخیر انطباق دوره آماری با چرخه‌های خورشیدی سه‌گانه است. ولی در این تحقیق اثر لکه‌های خورشیدی بر خشکسالی یا ترسالی‌ها یا موقعیت جت جنب حاره‌ای بررسی نشده است. بلکه هدف فقط تناظر دوره‌های آماری با سیکل‌های خورشیدی بوده است تا در صورت همسویی دوره‌های خشک و تر با بخشی از سیکل پرسش و زمینه تحقیقی برای این ارتباط و همسویی فراهم گردد. شکل ۲ موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های منتخب منطقه شمال‌شرق ایران را نشان می‌دهد.

در گام بعدی، با ملاک قرار دادن شاخص SPI با استفاده از نرم‌افزار DIP وضعیت ایستگاه‌ها در هر چرخه خورشیدی به لحاظ خشکی و مرطوبی مشخص شد. بدین منظور از میانگین بارش سالانه هر ایستگاه استفاده گردید. جدول ۱ یک نمونه از خروجی DIP

از ایستگاه‌های منطقه مطالعاتی در سیکل اول را نشان می‌دهد. براین اساس سال‌هایی که حداقل نصف ایستگاه‌های منتخب بر اساس شاخص فوق، ترسالی شدید را نشان دادند، به عنوان سال نمونه انتخاب شدند (شکل ۳)



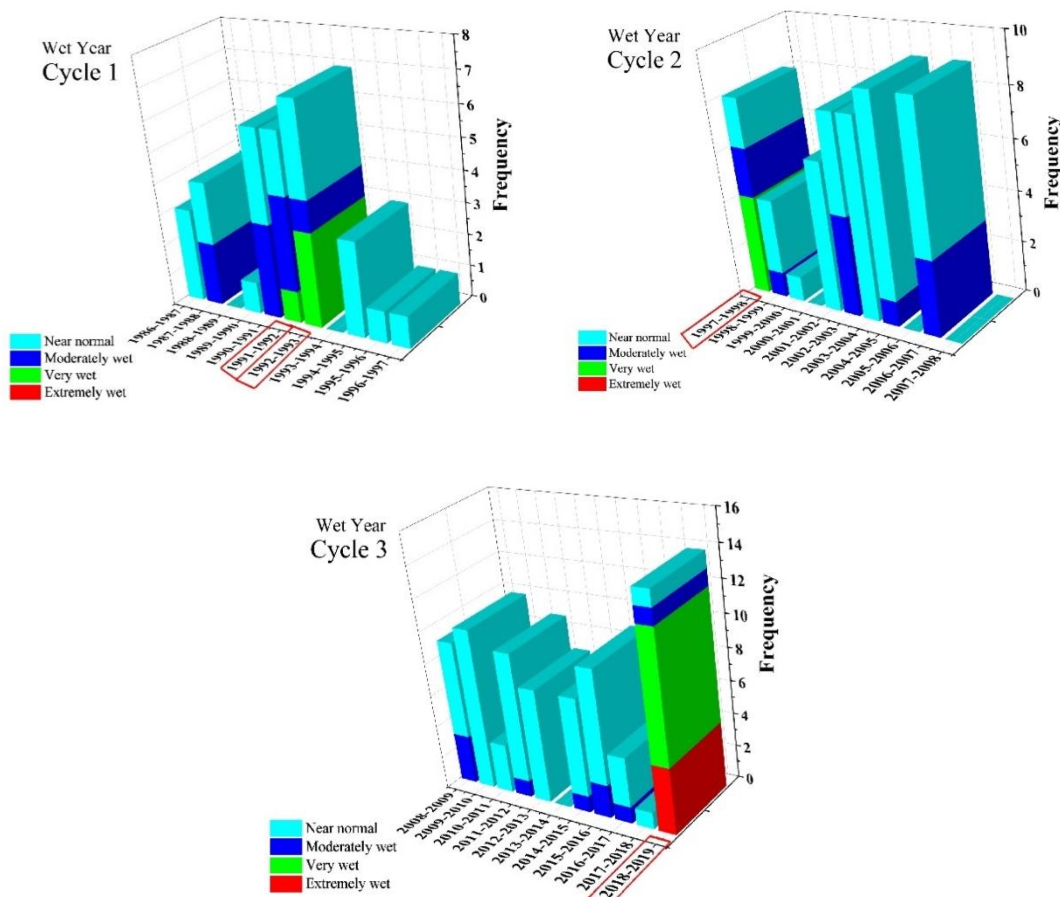
شکل ۲– موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های سینوپتیک منتخب منطقه شمال‌شرق ایران

Fig. 2. Geographical Location of selected synoptic stations in the northeastern region of Iran

جدول ۱– ایستگاه‌های درگیر با ترسالی بر اساس نتایج شاخص SPI در شمال‌شرق ایران

Table 1- Stations affected by wet based on SPI index results in northeastern of Iran

سال زراعی	ایستگاه	شاخص SPI	شدت خشکسالی
1992-93	Bojnord بجنورد	0.1	Near normal
1992-93	Mashhad مشهد	1.71	Very wet
1992-93	Quchan قوچان	0.6	Near normal
1992-93	Sabzevar سبزوار	0.75	Near normal
1992-93	Sarakhs سرخس	1.86	Very wet
1992-93	Torbate- Heydarieh تربت حیدریه	1.96	Very wet



شکل ۳- فراوانی ایستگاه‌های درگیر با ترسالی در شمال‌شرق ایران بر اساس نتایج شاخص SPI **(** به تفکیک چرخه خورشیدی**)**

Fig.3. Frequency of stations involved with a wet year in the Northeast of Iran (in solar cycles)

همان‌طور که مشاهده می‌شود، براساس چرخه‌های خورشیدی، ترسالی‌های شناسایی شده عبارتند از: ترسالی‌های چرخه اول (۱۹۹۲-۱۹۹۱ و ۱۹۹۳-۱۹۹۲)، ترسالی چرخه دوم (۱۹۹۷-۱۹۹۸) و ترسالی چرخه سوم (۲۰۱۸-۲۰۱۹). سپس، بارش‌های سنگین و فوق سنگین در ایستگاه‌های منطقه و بر اساس ترسالی‌های هر چرخه خورشیدی مشخص شدند. بر این اساس از کل روزهای بارشی در محدوده‌ی مطالعاتی، روزهای برابر یا بالاتر از صدک ۵۰ ام به عنوان روزهای دارای بارش سنگین در نظر گرفته شد. سپس داده‌های جوی این روزها مشتمل بر داده‌های مؤلفه‌ی باد مداری، مؤلفه‌ی باد نصف‌النهاری، ارتفاع ژئوپتانسیل در سطح ۲۵۰ هکتوپاسکال، فشار تراز دریا[1]، نم ویژه و امگا از تارنماهای مرکز ملی اقیانوس‌شناسی و محیط‌شناسی ایالات متحده آمریکا (NCEP/NCAR) و ECMWF برای ترازهای ۱۰۰۰، ۹۲۵، ۸۵۰، ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال در محدوده‌ی طول ۰ تا ۱۰۰ درجه شرقی و عرض ۰ تا ۶۵ درجه شمالی دریافت گردید. جهت شناسایی موقعیت مکانی محور و هسته‌ی رودباد جنب‌حاره در ترسالی‌های شدید شمال ایران، اسکریپتی نوشته و سپس در محیط نرم‌افزاری GRADS، اجرا و محور و هسته‌ی رودباد در تراز ۲۵۰ هکتوپاسکال ترسیم شد. از داده‌های فشار تراز دریا و ۱۰۰۰ تا ۸۵۰ هکتوپاسکال جهت منشأیابی سامانه‌های بارشی استفاده شده است.

1 - SLP

بدین ترتیب با بررسی چشمی بر روی نقشه‌های ترسیم‌شده از چینش و آرایش سامانه‌ها در لایه‌های زیرین و مرزی وردسپهر، الگوهای غالب در ترسالی‌ها شدید در منطقه‌ی مورد مطالعه انتخاب شدند. در مرحله‌ی بعد، داده‌های SLP برای نمونه‌های ترسالی هر چرخه أخذ و برای تحلیل عاملی از آنها استفاده شد؛ جهت شناسایی الگوی پرتکرار رودباد، روش تحلیل عاملی و معیار KMO و آزمون بارتلت در نرم‌افزار SPSS24 انجام گردید. مقدار KMO و بارتلت به دست آمده برای ترسالی‌های هر سیکل در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲- آزمون kmo و بارتلت برای اطمینان از مناسب بودن داده‌ها برای تحلیل عاملی

Table 2- KMO and Bartlett tests to ensure that the data are suitable for factor analysis

Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy.		**0.850**
Bartlett's Test of Sphericity	Approx. Chi-Square	161505.391
	df	1326
	Sig	0.000

با توجه به نتایج، مقادیر محاسبه شده‌ی آزمون بارتلت برای ترسالی‌های هر چرخه در سطح P<0.000 معنادار شده است و مقادیر kmo بیش از ۰/۸ ، نشان می‌دهد که داده‌ها برای تحلیل عاملی مناسب هستند. تحلیل عاملی با چرخش واریمکس برای ترسالی‌های شدید چرخه‌های خورشیدی در شمال‌شرق ایران نشان داد که ۹ عامل با پراش بالای یک، حدوداً ۹۱ درصد پراش داده‌ها را تبیین می‌کند، به طوری که عامل اول حدوداً ۳۵/۱۰ درصد از پراش داده‌ها را باعث می‌شود. در پایان برای انتخاب الگوهای همدید غالب از نقشه‌های تراز ۱۰۰۰ تا ۸۵۰ هکتوپاسکال استفاده گردید و با بررسی چشمی مکرر الگوهای همدیدی شناسایی و با الگوهای استخراجی از تحلیل عاملی مقایسه شده و الگوی نهایی انتخاب شد.

نتایج و بحث

بر اساس نتایج تحلیل عاملی و سپس بررسی‌های مکرر و دقیق چشمی بر روی نقشه‌های همدیدی ترازهای ۱۰۰۰ تا ۸۵۰ هکتوپاسکال در روزهای بارشی سنگین و فوق سنگین منطقه، الگوی همدیدی (کم‌فشار سودانی) پرتکرارترین الگوی شناسایی شده در منطقه مورد مطالعه بوده است (جدول ۳). به طوری که در شدیدترین روزهای بارشی منطقه در هر سه چرخه خورشیدی، در ۲۶ مورد از مجموع ۵۹ مورد الگوهای همدیدی شناسایی شده، الگوی همدیدی همدیدی کم‌فشار سودانی بوده و پس از آن الگوی همدیدی کم‌فشار سودانی/ واچرخند مهاجر است که در ۱۶ مورد از بارش‌های سنگین منطقه در هر سه چرخه‌ی خورشیدی شناسایی شد. بنابراین در این پژوهش، پس از تحلیل موقعیت جریان رودبادی جنب‌حاره در ترسالی‌های شدید شمال‌شرق ایران، یک نمونه از الگوی کم‌فشار سودانی مورد تحلیل قرار گرفته است.

تحلیل موقعیت مکانی رودباد جنب‌حاره در ترسالی‌های شمال‌شرق ایران

موقعیت هسته‌ها و موقعیت روزانه‌ی محور رودباد جنب‌حاره برای تراز ۲۵۰ هکتوپاسکال برای تمام روزهای بارشی در ترسالی‌های شدید سه چرخه خورشیدی برای شمال‌شرق ایران ترسیم و با یکدیگر مقایسه شد. در تمامی روزهایی که بارش در ایستگاه‌ها ثبت شده، در برخی موارد هسته‌های رودباد در عرض‌های پایین‌تر جغرافیایی قرار داشته و محورها نیز از پهنه‌های جنوبی عبور کرده‌اند و در مواردی نیز انتهای محورها از مناطق شمالی ایران عبور کرده است. در این پژوهش، موقعیت هسته‌ها و محورها در مواردی که از

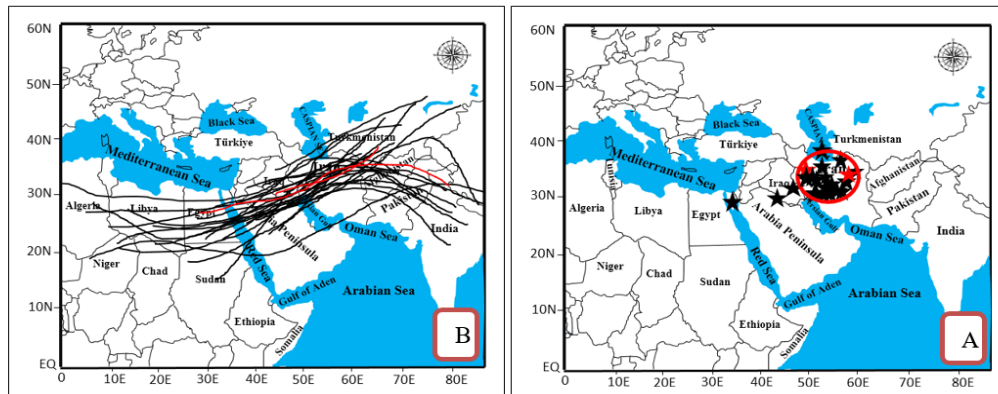
نیمه‌ی شمالی عبور کرده‌اند، بررسی شده است. سال‌های زراعی ۱۹۹۲-۱۹۹۱ و ۱۹۹۳-۱۹۹۲ ترسالی‌های استخراجی در چرخه خورشیدی اول می‌باشند.

جدول۳- مشخصات سامانه‌های بارشی ترسالی‌ها، شمال‌شرق ایران در چرخه‌های خورشیدی بر اساس صدک ۵۰

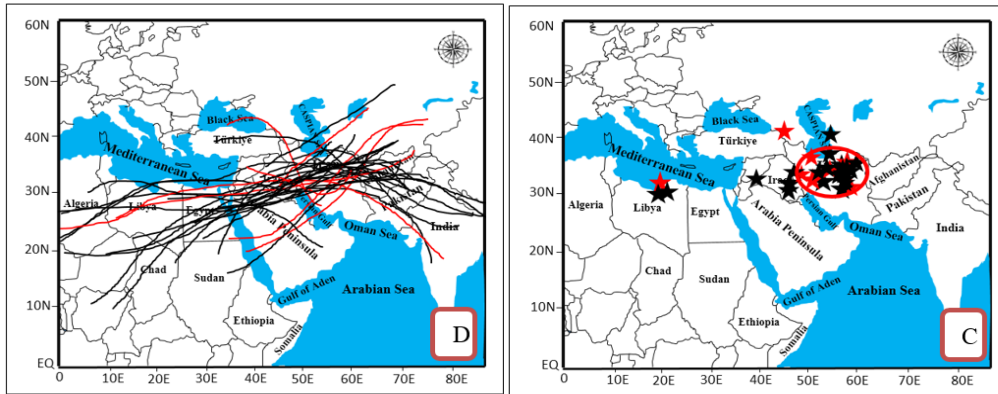
Table 3- Characteristics of the rainfall systems in wet years, the northeastern of Iran in three solar cycles based on the 50th percentile

ردیف No	الگوهای همدیدی Synoptic Patterrns چرخه اول Cycle 1	چرخه دوم Cycle 2	چرخه سوم Cycle 3
1	کم‌فشار سودانی Sudan Low Pressure	کم‌فشار سودانی Sudan Low Pressure	کم‌فشار سودانی Sudan Low Pressure
2	کم‌فشار سودانی/ مدیترانه Sudanie/Mediterranean	کم‌فشار سودانی/ چرخند مدیترانه Sudanie/Mediterranean	کم‌فشار سودانی/ چرخند مدیترانه Sudanie/Mediterranean
3	واچرخند مهاجر Migratory Anticuclone	واچرخند مهاجر Migratory Anticuclone	واچرخند مهاجر Migratory Anticuclone
4	کم‌فشار سودانی/ واچرخند سیبری Sudanie/ Siberian	کم‌فشار سودانی/ واچرخند سیبری Sudanie/ Siberian	کم‌فشار سودانی/ واچرخند سیبری Sudanie/ Siberian
5	کم‌فشار سودانی / واچرخند مهاجر Sudanie/ Migratory Anticuclone	کم‌فشار سودانی / واچرخند مهاجر Sudanie/ Migratory Anticuclone	کم‌فشار سودانی / واچرخند مهاجر Sudanie/ Migratory Anticuclone

شکل ۴ موقعیت هسته و محور رودباد را برای ترسالی‌های چرخه اول نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در ترسالی ۱۹۹۱-۹۲ هسته‌های سرعت در روزهای بارشی در پهنه ای بین طول ۳۵ درجه تا ۵۸ درجه شرقی و عرض ۲۸ تا ۳۷ درجه شمالی استقرار داشته‌اند (شکل ۴A). بیشتر هسته‌ها در نواحی مرکزی ایران مستقر هستند. در این ترسالی تعداد روزهای با بارش‌های سنگین بر طبق معیار میانگین بارش بیش از ۵ میلی‌متر کمتر رخ داده است. بر روی نقشه موقعیت هسته‌ی رودباد در روزهای فوق با رنگ قرمز مشخص است. مجموع بارش در دور روز بارش سنگین ۱۰۴ میلی‌متر بوده که از ۶ ایستگاه در منطقه مطالعاتی گزارش شده است. شدیدترین روز بارشی ۱۳ دسامبر ۱۹۹۱ با مجموع بارش ۷۰ میلی‌متر می‌باشد. هسته‌ی مرکزی رودباد در این روز بر روی استان همدان قرار داشت و محور رودباد با راستای جنوب‌غربی – شمال‌شرقی در طول شرقی ۴۰ درجه تا ۶۳ درجه، از غرب عراق تا شمال‌شرق ایران و ترکمنستان گسترش یافته است. در ترسالی ۱۹۹۳-۱۹۹۲ هسته‌های سرعت پهنه‌ای بین ۲۰ درجه تا ۶۰ درجه طول شرقی و ۲۸ تا ۴۰ درجه عرض شمالی استقرار داشتند که در مقایسه با ترسالی ۹۲-۱۹۹۱ پراکندگی بیشتری داشتند، ولی در محدوده‌ی کرمانشاه تا خراسان رضوی و از نواحی داخلی ایران تا جنوب دریای خزر متمرکز شده‌اند (شکل۴C). در ترسالی فوق، تعداد روزهایی که بارش شدید گزارش شده است نسبت به ترسالی ۹۲-۱۹۹۱ بیشتر بوده و در ۹ مورد بارش بیش از ۵۲۰ میلی‌متر ثبت شد. شدیدترین روزهای بارشی در این ترسالی ۵ فوریه ۱۹۹۳ با مجموع ۱۲۶ میلی‌متر و ۸ می ۱۹۹۳ با مجموع ۱۰۸ میلی‌متر که از ۶ ایستگاه منطقه به ثبت رسید. در روزهای فوق هسته‌ی سرعت به‌ترتیب بر روی خراسان رضوی، شمالی و لرستان مستقر بود. در هر دو ترسالی تمرکز هسته‌ها بر روی منطقه مطالعاتی بر روی بارش‌های منطقه تأثیر داشتند. محور رودبادها در هر دو ترسالی بندرت گرایش مداری داشته و با کشیدگی زیاد از شمال افریقا تا آسیای میانه و در مواردی تا پاکستان و هند قرار گرفتند و پس از عبور از شمال‌شرق صحرای افریقا، از روی دریای سرخ و شمال عربستان امتدادی نصف النهاری پیدا کرده و در محدوده‌ی جنوب‌غرب تا کرمانشاه وارد ایران شده‌اند؛ ولی تمرکز محورها در محدوده شمال استان کرمانشاه تا کردستان بیش از سایر بخش‌ها بوده است. در چرخه‌ی دوم خورشیدی (۱۹۹۷-۲۰۰۸) یک ترسالی در شمال‌شرق شناسایی شد. ترسالی ۱۹۹۸-۱۹۹۷ تنها ترسالی استخراجی از چرخه‌ی دوم می‌باشد. شکل ۵ موقعیت هسته‌ها و محورهای رودباد جنب حاره را برای این ترسالی نشان می‌دهد.

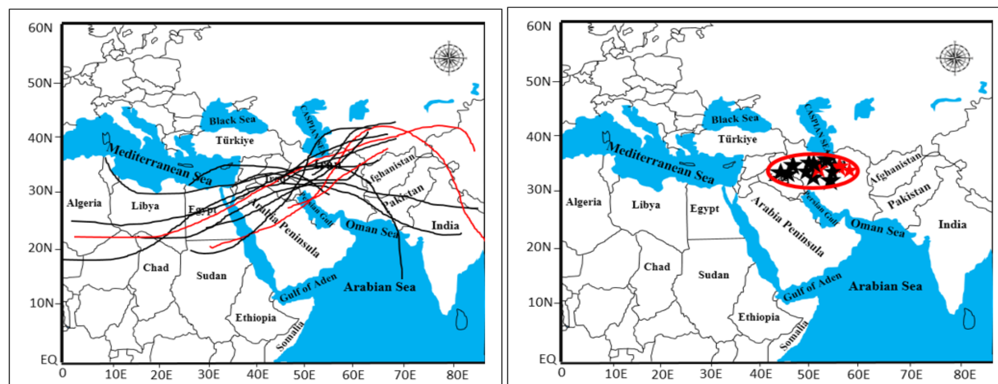


همان‌طور که مشاهده می‌شود تمامی هسته‌های رودباد در روزهای بارشی بصورت همگن و متمرکز در طول ۴۲ درجه تا ۶۰ درجه شرقی و عرض ۳۲ درجه تا ۳۶ درجه شمالی در محدوده‌ی مرکز عراق تا استان سمنان قرار گرفتند.



شکل ۴- مراکز هسته و محورهای رودباد جنب‌حاره در ترسالی‌های شمال‌شرق ایران، تراز ۲۵۰ هکتوپاسکال، چرخه اول؛ (A وB) ترسالی ۱۹۹۱-۱۹۹۲؛ (C و D) ترسالی ۱۹۹۲-۱۹۹۳

Fig. 4. Core centers and axes of the SJS in wet years of the Northeast of Iran, 250 hPa level, the first cycle; (A and B) wet year of 1991-1992; (C and D) wet year of 1992-1993

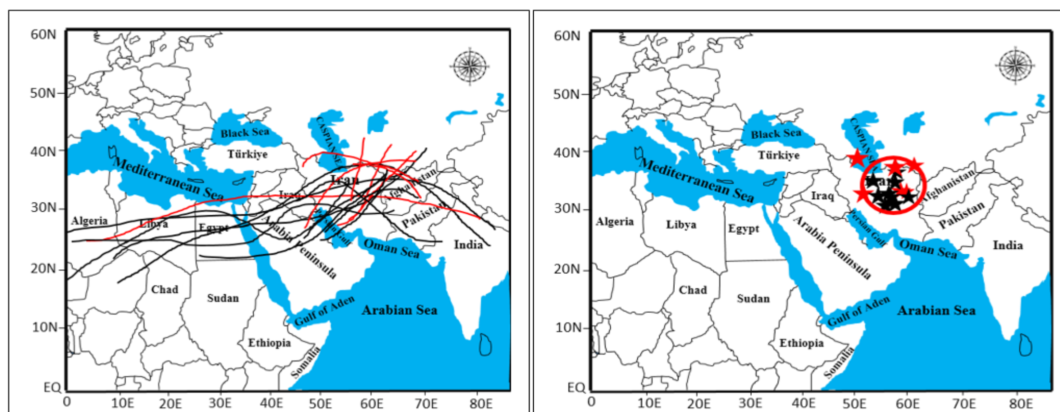


شکل ۵- مراکز هسته و محورهای رودباد جنب‌حاره در ترسالی شمال‌شرق ایران، تراز ۲۵۰ هکتوپاسکال، چرخه دوم(۱۹۹۷-۱۹۹۸)

Fig. 5. Core centers and axes of the SJS in wet years of the Northeast of Iran, 250 hPa level, the second cycle (1997-1998)

در این ترسالی ۵ مورد بارش شدید براساس معیارهای ذکر شده و با مجموع بارش ۳۶۳ میلی‌متر از ۹ ایستگاه گزارش شده است که بر روی نقشه، محورها و هسته‌های سرعت رودباد در این روزها با رنگ قرمز متمایز شده است؛ همان‌طور که ملاحظه می‌شود، هسته‌های مرکزی رودباد به ویژه در شدیدترین روزهای بارشی، در محدوده‌ی قزوین و استان سمنان استقرار داشت. همچنین شدیدترین روز بارشی ۶ ژانویه ۱۹۹۸ با مجموع بارش ۱۱۳ میلی‌متر می‌باشد که در این روز هسته‌ی مرکزی رودباد جنب‌حاره با سرعت بیش از ۶۰ متر بر ثانیه بر روی بجنورد و شیروان قرار داشت و محور رودباد با راستای جنوب‌غربی – شمال‌شرقی ا ز شمال سودان تا آسیای میانه و سپس هندوستان گسترش یافته و گرایشی کاملا نصف‌النهاری داشته است. هسته‌های رودباد در این ترسالی در مقایسه با ترسالی‌های چرخه اول متمرکزتر بوده و پراکنده نبوده‌اند و موقعیت استقرار آنها ۴ درجه به سمت عرض‌های بالاتر جابجا شده است. در این ترسالی نیز همانند ترسالی‌های چرخه اول، بیشتر هسته‌های مرکزی رودباد در عرض‌های پایین‌تر استقرار داشتند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، محورهای رودباد در تمامی موارد گرایشی نصف‌النهاری داشتند و با کشیدگی زیاد از شمال صحرای افریقا تا هند گسترش یافتند. محورها از شمال خوزستان تا کرمانشاه وارد ایران شده ولی در محدوده‌ی زنجان تا سمنان متمرکز بودند.

در چرخه‌ی سوم خورشیدی در شمال‌شرق ایران ترسالی (۲۰۱۸-۲۰۱۹) شناسایی شد (شکل ۶). در این ترسالی با وجود تعداد کم روزهای بارشی، ولی بارش‌های شدید با میانگین بیش از ۱۰ میلی‌متر، بیشتر از ترسالی‌های چرخه‌های اول و دوم بود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، هسته‌های مرکزی رودباد به صورت همگن و متمرکز در طول شرقی ۴۸ درجه تا ۶۰ درجه و عرض شمالی ۳۳ درجه تا ۴۰ درجه و در محدوده‌ی شمال‌شرق ایران قرار دارند. در این ترسالی ۷ روز توأم با بارش‌های شدید با مجموع بارش بیش از ۹۷۰ میلی‌متر ثبت شد که نسبت به ترسالی‌های چرخه اول و دوم مقادیر بارش بیشتر بوده است؛ شدیدترین روز بارشی ۱۴ آوریل ۲۰۱۹ با مقدار ۱۸۷ میلی‌متر که از ۱۴ ایستگاه منطقه مطالعاتی گزارش شد. در این روز هسته‌ی مرکزی رودباد با سرعتی بیش از ۳۵ متر بر ثانیه بر روی خراسان شمالی مستقر بود. در مقایسه با ترسالی‌های چرخه اول و دوم، در ترسالی چرخه سوم هسته‌های رودباد پراکنش نداشته و کاملاً بر روی شمال‌شرق ایران مستقر بودند که تأثیر زیادی بر شدت بارش‌های منطقه داشته است. محورهای رودباد با کشیدگی زیاد از محدوده‌ی شمال صحرای افریقا امتداد یافته و پس از عبور از دریای سرخ گرایشی نصف‌النهاری پیدا کرده و تا آسیای میانه و هند گسترش یافتند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در شدیدترین روزهای بارشی محور رودبادها، که با رنگ قرمز مشخص شده است، در مقایسه با ترسالی‌های چرخه‌های گذشته، کوتاه‌تر و کاملاً نصف‌النهاری شده‌اند که این شرایط بیانگر افزایش سرعت هسته‌ی رودباد می‌باشد که به تبعِ آن شیوه فشاری افزایش یافته است.



شکل ۶- مراکز هسته و محورهای رودباد جنب‌حاره در ترسالی شمال‌شرق ایران، تراز ۲۵۰ هکتوپاسکال، چرخه سوم (۲۰۱۹-۲۰۱۸)

Fig. 6. core centers and axes of the SJS in wet years of the Northeast of Iran, 250 hPa level, the third cycle (2018-2019)

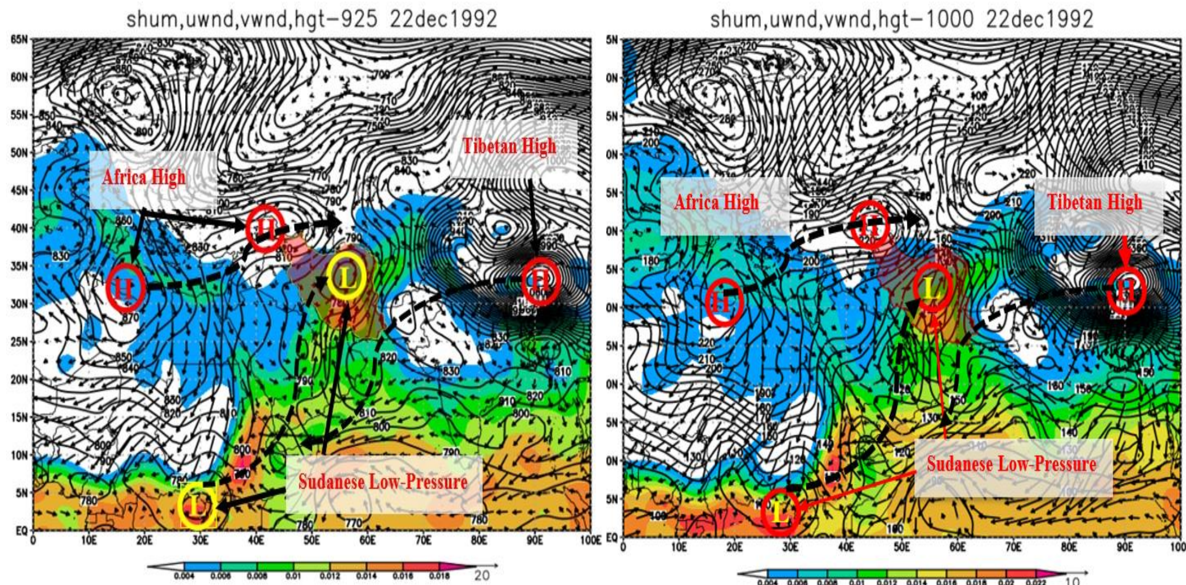
تحلیل همدیدی الگوی کم‌فشار سودان (سامانه نمونه این الگو ۲۲ دسامبر ۱۹۹۲)

برای تحلیل همدیدی سامانه‌ی غالب در ترسالی‌های شمال‌شرق ایران، از نقشه‌های ترکیبی (ارتفاع ژئوپتانسیل، جریان و نم ویژه) برای ترازهای ۱۰۰۰، ۹۲۵، ۸۵۰ و ۷۰۰ هکتوپاسکال و همچنین نقشه‌های ترکیبی (ارتفاع ژئوپتانسیل، جریان و امگا) برای ترازهای ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال استفاده شده است. در این الگو، کم‌فشار سودان نقش اساسی در تأمین بارش‌های سنگین شمال‌شرق ایران داشته است. این سامانه‌ی بارشی دو روز (۲۲ و ۲۳ دسامبر ۱۹۹۲) بر منطقه حاکمیت داشت. شکل‌های ۷ تا ۹ چینش سامانه‌ها را در ترازهای زیرین، مرزی و میانی وردسپهر در روز ۲۲ دسامبر ۱۹۹۲ نشان می‌دهد.

شکل ۷ ساختار و آرایش سامانه‌ها را در لایه‌های زیرین وردسپهر نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، کم‌فشار سودان در موقعیت همیشگی خود قرار گرفته و زبانه‌ای از آن در امتداد جنوب‌غربی –شمال‌شرقی بر روی شرق عربستان و نواحی شمال‌شرقی ایران مستقر شد. همزمان واچرخند شمال افریقا با گسترش شمال‌سو بر روی دریای مدیترانه قرار گرفته است و موجب فرارفت سرد عرض‌های شمالی به سمت عرض‌های جنوبی‌تر و پشت سامانه‌ی سودانی شده است. این فرارفت سرد، شیو دمایی را در دامنه‌ی غربی کم‌فشار سودان افزایش داده است. در عین حال زبانه‌ای از واچرخند تبت با گسترش جنوب‌سو بر روی دریاهای گرم عمان و عرب قرار گرفته است؛ با نفوذ هوای سرد بر روی آبهای گرم جنوب، به تدریج ناپایدار شده و رطوبت مناسبی در گردش ساعتگرد این واچرخند به دامنه‌ی شرقی کم‌فشار سودانی فرارفت می‌شود؛ در ادامه رطوبت فرارفت شده، از طریق جریانات جنوبی به نیمه‌ی شرقی ایران از جمله شمال‌شرق فرارفت شده است. میدان رطوبتی شکل گرفته در هر دو تراز ۱۰۰۰ و ۹۲۵ هکتوپاسکال بر روی استان هرمزگان و به مقدار ۱۴ تا ۱۶ گرم بر کیلوگرم در تراز ۱۰۰۰ و ۱۲ تا ۱۴ گرم بر کیلوگرم در تراز ۹۲۵ هکتوپاسکال، بیانگر این فرارفت رطوبتی از طریق واچرخند ثبت می‌باشد.

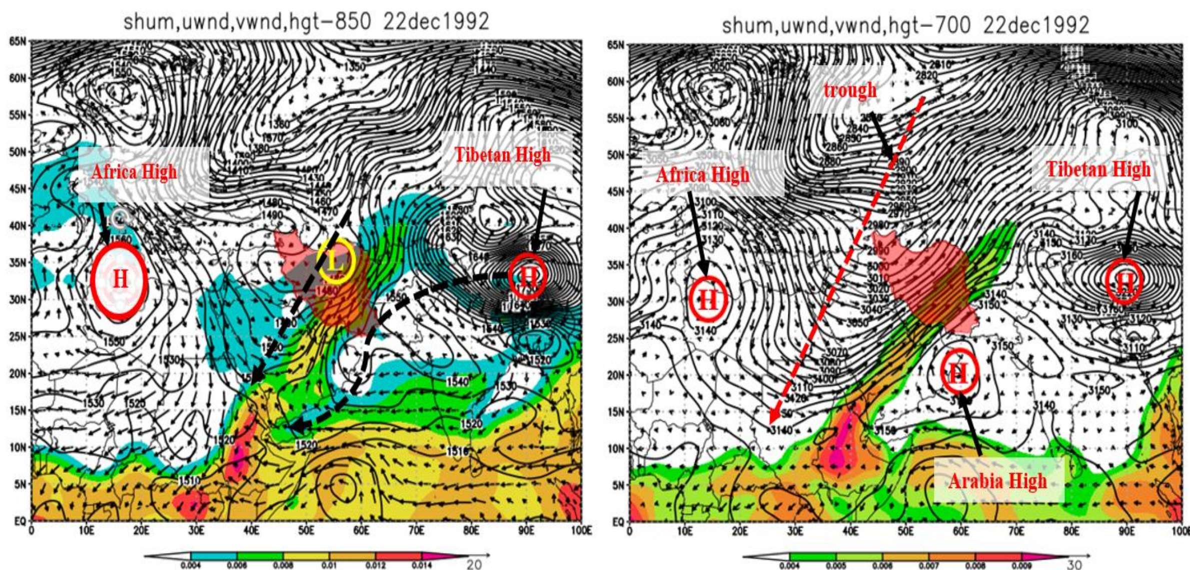
شکل ۸ ساختار سامانه‌ها را در ترازهای ۸۵۰ و ۷۰۰ هکتوپاسکال نشان می‌دهد. در لایه‌ی مرزی، زبانه‌ای از کم‌فشار سودان به صورت هسته‌ی مستقل با منحنی ارتفاعی ۱۴۷۰ ژئوپتانسیل متر شمال‌شرق ایران استقرار یافته و تمام پهنه‌ی ایران تا سوریه را در بر گرفته است. این در حالی است که زبانه‌ای از پرفشار تبت در امتداد شمال‌شرقی – جنوب‌غربی به عرض‌های پایین‌تر گسترش یافت. پیشروی این زبانه واچرخندی بر روی دریاهای عمان، عرب و خلیج عدن سبب فرارفت گرم و مرطوب به درون کم‌فشار سودانی شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود رطوبت این دریاها از طریق جریانات جنوبی به جلوی کم‌فشار سودان و در ادامه به مناطق شرقی و شمال‌شرقی ایران فرارفت می‌شود. هسته‌ی مرکزی واچرخند شمال افریقا در این تراز کاملا بر روی دریای مدیترانه استقرار یافت که موجب ریزش هوای سرد عرض‌های شمالی بر پشت سامانه سودانی شده است.

فرارفت سرد از طریق جریانات شمالی به پشت سامانه‌ی سودانی و فرارفت گرم و مرطوب از طریق جریانات جنوبی به دامنه‌ی شرقی آن سبب تقویت این سامانه شده و سبب تشکیل هسته‌ی رطوبتی به بزرگای ۱۴ گرم بر کیلوگرم بر روی کشور اتیوپی شده است که از طریق کانال رطوبتی به جنوب تا شمال‌شرق ایران منتقل شده است. در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال واچرخند شمال افریقا با جابجایی جنوب‌سو بر روی کشور لیبی قرار گرفته و تضعیف شده است؛ در حالیکه واچرخند عربستان با توجه به دور شدن از واداشت‌های سطحی، در این تراز تظاهر یافته است؛ هسته‌ی مرکزی این واچرخند با منحنی ارتفاعی ۳۱۷۰ ژئوپتانسیل متر در جنوب شبه جزیره عربستان و بر روی آبهای دریای عرب شکل گرفت. در عین حال ناوه‌ای عمیق از جنوب دریای سیاه با راستای شمال‌شرقی –جنوب‌غربی بر روی کشورهای عراق، عربستان تا شمال سودان و جنوب دریای سرخ تا عرض ۱۲ درجه گسترش یافت. ریزش هوای سرد عرض‌های شمالی از طریق ناوه به سمت عرض‌های گرم جنوبی، شیو دمایی را بر روی دریای سرخ و مرکز عربستان تشدید کرده است. در این حالت جنوب، جنوب‌شرق و شمال‌شرق ایران در جلوی ناوه و بیشترین ناپایداری‌ها قرار گرفته است. رطوبت فرارفت شده به جلوی ناوه و در ادامه به منطقه مطالعاتی از طریق گردش ساعتگرد واچرخند عربستان که در جایگاه مناسبی بر روی آبهای دریای عرب قرار گرفته است، و همچنین دریای سرخ تأمین می‌شود.



شکل ۷- ارتفاع ژئوپتانسیل (کانتور)، میدان باد (بردار) و نم ویژه (سایه‌دار)، ترازهای ۱۰۰۰ و ۹۲۵ هکتوپاسکال، ۲۲ دسامبر ۱۹۹۲، شمال‌شرق

Fig. 7. Geopotential height (contour), wind field (vector) and specific humidity (shaded) at 1000 & 925 hPa levels on December 22, 1992

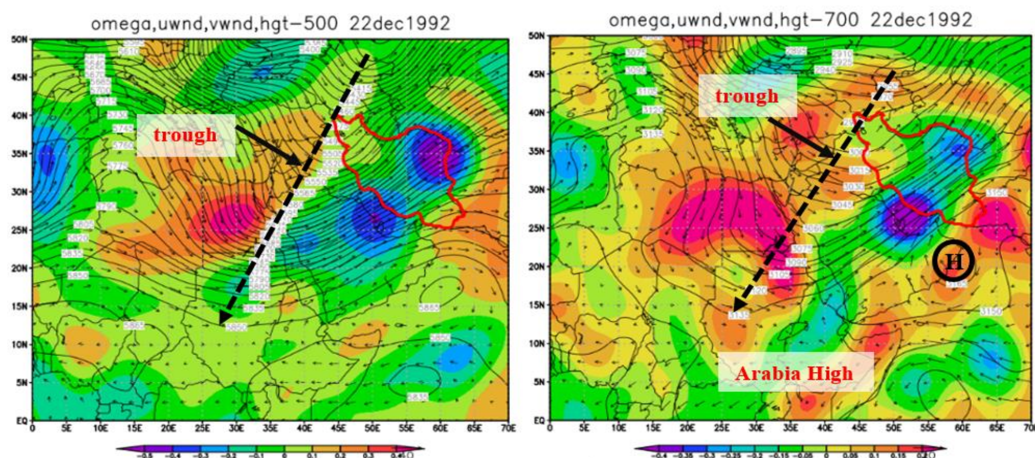


شکل ۸- ارتفاع ژئوپتانسیل (کانتور)، میدان باد (بردار) و نم ویژه (سایه‌دار)، ترازهای ۸۵۰ و ۷۰۰ هکتوپاسکال، ۲۲ دسامبر ۱۹۹۲، شمال‌شرق

Fig. 8. Geopotential height (contour), wind field (vector) and specific humidity (shaded) at 850 & 700 hPa levels on December 22, 1992

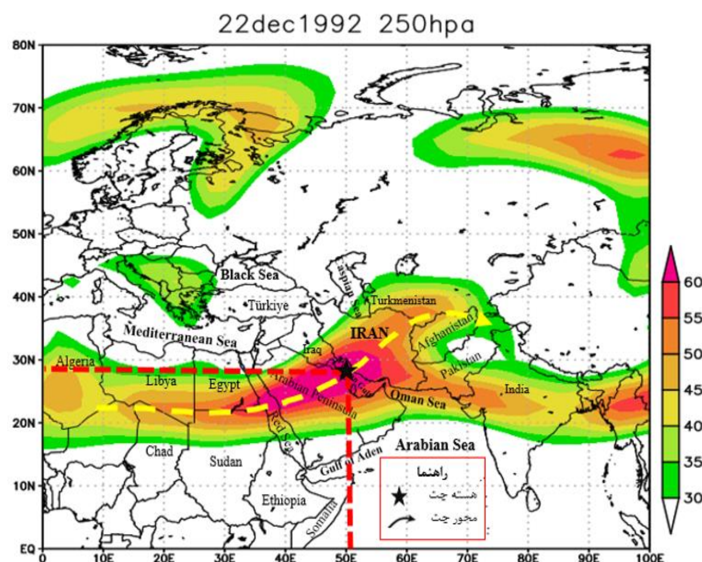
شکل ۹ نقشه امگا در ترازهای ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال را در روز ۱۳ دسامبر ۱۹۹۱ نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل فوق مشاهده می‌شود در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال ناوه‌ی عمیق با راستای شمالی – جنوبی از عرض ۵۰ درجه شمالی تا عرض‌های پایین‌تر (۱۲ درجه شمالی) گسترش یافته است. فرارفت سرد در این تراز به سمت عرض‌های جنوبی شیو حرارتی را در شمال عربستان و جنوب ایران تشدید کرده است؛ همچنان که هسته‌ی سرعت رودباد جنب‌حاره‌ای در مناطق فوق استقرار داشت. وجود دو میدان امگای منفی با بزرگای ۰/۵- پاسکال بر ثانیه بر روی خلیج فارس و شمال‌شرق ایران نشان‌دهنده‌ی صعود شدید هوا در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال است. وجود جریانات بالاسوی قوی و فرارفت رطوبتی از لایه‌های زیرین شرایط را برای وقوع بارش‌های همدیدی فراهم کرده است. امگای منفی شدید بر روی منطقه مطالعاتی توجیه کننده‌ی وجود ناپایداری‌های شدید در منطقه است. این در حالی است که در تراز پایین‌تر (۷۰۰ هکتوپاسکال) میدان امگای منفی شدید با بزرگای ۰/۴- پاسکال بر ثانیه بر روی خلیج فارس و با شدت کمتر با بزرگای ۰/۳- پاسکال بر ثانیه بر روی خراسان رضوی ایجاد شده است.

شکل ۱۰موقعیت مکانی رودباد جنب‌حاره در روز ۲۲ دسامبر ۱۹۹۲ مشاهده می‌شود. در این روز جریانی از رودباد جنب‌حاره از شمال شرق صحرای افریقا امتداد یافته و پس از عبور از دریای سرخ گرایشی نصف‌النهاری پیدا کرده و از جنوب‌غرب وارد ایران و سپس در همان امتداد تا آسیای میانه گسترش یافته است. تمام پهنه‌ی ایران غیر از شمال‌غرب را دربرگرفته است.



شکل ۹- نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل (کانتور)، میدان باد (بردار) و امگا (سایه‌دار)، ترازهای ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال، ۲۲ دسامبر ۱۹۹۲، شمال‌شرق ایران

Fig. 9. Map of geopotential height (contour), wind field (vector) and omega (shaded) at 500 & 700 hPa levels on December 22, 1992



شکل ۱۰- نقشه‌ی رودباد، تراز ۲۵۰ هکتوپاسکال، ۲۲ دسامبر ۱۹۹۲، شمال‌شرق ایران
Fig. 10. The SJS map at 250 hPa level on December 22, 1992

بدین ترتیب بیشتر مناطق ایران از جمله شمال‌شرق، در زیر منطقه واگرایی هسته‌ی مرکزی رودباد با سرعت بیش از ۶۰ متر بر ثانیه بر روی دریای سرخ، مرکز عربستان تا استان‌های جنوبی ایران در طول ۳۸ درجه تا ۵۸ درجه شرقی و عرض ۲۱ درجه تا ۳۱ درجه شمالی استقرار دارد. مناطق فوق بر جلوی ناوه قرار دارند که نمایانگر ناپایداری شدید می‌باشد. همان‌طور که اشاره شد، محور رودباد در یک راستای جنوب‌غربی –شمال‌شرقی وارد شمال‌شرق ایران شده و انحنای نصف‌النهاری داشته است که این مسئله شرایط مساعدی جهت تشدید جریانات بالاسو و تقویت سامانه‌ی سودانی و همچنین ناپایداری‌های شدید ایجاد کرده است. این سامانه‌ی بارشی دو روز در شمال‌شرق ایران فعالیت داشت و ۹۷ میلی‌متر بارش در ۶ ایستگاه‌های منطقه به ثبت رشیده است.

نتیجه‌گیری

رودبادها یکی از سیستم‌های سینوپتیک می‌باشند که موقعیت مکانی، زمانی و شرایط استقرار آن در کنار ویژگی‌های دینامیکی‌شان بر وضعیت اقلیم یک منطقه از جمله دوره‌های تر و خشک هر منطقه تأثیر می‌گذارد. بر اساس نتایج پژوهش‌های محمدی و لشکری (Mohammadi & Lashkari, 2018) و ابراهیمی‌نیک (Ebrahimi Nick, 2012)، تراز مناسب جهت بررسی رودبادها، ترازهای ۳۰۰ تا ۲۰۰ هکتوپاسکال است. پژوهش حاضر با مرور مطالعات گذشته، تراز ۲۵۰ هکتوپاسکال را مناسب‌ترین تراز برای بررسی موقعیت مکانی و زمانی رودباد جنب‌حاره در منطقه‌ی شمال‌شرق ایران شناسایی کرده است؛ و برای تمام روزها در سه چرخه‌ی خورشیدی (۲۲، ۲۳ و ۲۴) که سامانه‌ی بارشی وارد منطقه مطالعاتی شده‌اند، رودباد جنب‌حاره‌ای در تراز فوق مورد بررسی قرار گرفتند. در تمامی روزهایی که بارش‌های شدید در ایستگاه‌های منطقه ثبت شد، در برخی موارد جریان‌های رودبادی جنب‌حاره در عرض‌های پایین‌تر و جنوبی‌تر استقرار داشته و در مواردی نیز در عرض‌های جغرافیایی بالاتر و بر روی نیمه‌ی شمالی ایران قرار گرفتند. بهترین موقعیت استقرار جریان رودبادی جنب‌حاره برای ایجاد شرایط دینامیکی مناسب و ایجاد ناپایداری‌های شدید در منطقه شمال‌شرق ایران، در محدوده‌ی غرب ایران تا استان سمنان و جنوب دریای خزر قرار گیرد؛ و محور جریان رودبادی با گرایشی کاملاً نصف‌النهاری از مصر تا آسیای میانه امتداد یابد. در بررسی و تحلیل الگوهای همدیدی، از بین الگوهای همدیدی شناسایی شده در ترسالی‌های شدید شمال‌شرق ایران در چرخه‌های خورشیدی ذکر شده، الگوی کم‌فشار سودان، تأثیر بیشتری بر بارش‌های منطقه مزبور داشته

است. ساختار سامانه‌ها در این الگو به گونه‌ای بوده است که در ترازهای زیرین وردسپهر کم‌فشار سودانی با حرکت در راستای جنوب‌غربی –شمال‌شرقی بر روی شرق و شمال‌شرق ایران مستقر شده است؛ و همزمان واچرخند افریقا بر روی دریای مدیترانه قرار گرفته و ضمن فرارفت سرد عرض‌های شمالی بر پشت سامانه‌ی سودانی، شیو دمایی را در دامنه‌ی غربی کم‌فشار سودان افزایش داد. از طرفی، زبانه‌ی واچرخند تبت با گسترش بر روی دریاهای گرم عمان و عرب، رطوبت این دریاها را درون سامانه‌ی سودانی و در ادامه به شمال‌شرق ایران فرارفت می‌کند. در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال و بالاتر نیز، وجود ناوه‌ای عمیق از شمال‌غرب ایران تا جنوب شبه جزیره عربستان، سبب شده است تا شمال‌شرق ایران در بازوی راست ناوه قرار گیرد؛ در عین حال واچرخند عربستان بر روی دریای عرب استقرار یافته و با گردش واچرخندی رطوبت این دریا را به جلوی ناوه فرارفت کند؛ در این حالت، شرایط مساعدی برای ایجاد بارش‌های همرفتی در شمال‌شرق ایران فراهم می‌گردد.

References

Abish, B., Joseph, P. V., & Johannessen, O. M. (2015). Climate Change in the Subtropical Jetstream during 1950–2009. *Advances in Atmospheric Sciences*, *32*, 140–148. https://doi.org/10.1007/s00376-014-4156-6

Ahmadi, H., & Fallah Qalheri, G. A. (2015). Classification of agricultural climate in the north-east of Iran based on thermal and humidity conditions. *Agricultural Meteorology*, *3*(1), 67-81. [In Persian] https://www.agrimet.ir/article_54950.html

Alijani, B., Khosravi, M., & Esmailnejad, M. (2011). A synoptic analysis of January 6, 2008 heavy precipitation in the southeast of Iran. *Journal of Climate Research*, *1*(3-4), 3-14. [In Persian]

Archer, C. L., & Caldeira1, K. (2008). Historical trends in the jet streams. *Geophysical Research Letters*, *35*, L08803. https://doi.org/10.1029/2008GL033614

Asiri, M. A., Almazroui, M., & Awad, A. M. (2020). Synoptic features associated with the winter variability of the subtropical jet stream over Africa and the Middle East. *Meteorology and Atmospheric Physics*, *132*, 819-831. https://doi.org/10.1007/s00703-019-00722-4

Azizi, G., Nayeri, M., & Rostami Jalilian, S. (2009). Synoptic analysis of heavy precipitation in west of Iran. *Journal of Physical Geography*, *1*(4), 1-13. [In Persian]

Babaee, O., & Fattahi, E. (2014). Synoptic Classification Models of Precipitation in the Coastel Areas of the Caspian Sea, Physical Geograghy Research, 46(1), 19-42. [In Persian] https://doi.org/10.22059/jphgr.2014.50617

Bani Naeimeh, S., Lashkari, H., Ghorbanian, J., & Morshedi, J. (2023). Synoptic analysis of extremely heavy rains and its effect on the peak discharge of Dez river floods (floods of 1993 and 2005). *Water and Soil Management and Modelling*, *3*(3), 37-55. [In Persian] https://doi.org/10.22098/mmws.2022.11216.1107

Bijandi, M., Daryabari, S. J., Ranjbar Saadat Abadi, A., & Arbabisabzevari, A. (2022). Invegtigation of extreme precipitation events over northeastern Iran during the period 2001-2020. *Journal of Meteorology and Atmospheric Science*, *4*(4), 284-307. [In Persian] https://www.ims-jmas.net/article_170989.html

Darand, M. (2015). Analysis of Jet Streams Frequency Occurrence during Heavy Precipitation over Kurdistan, Province. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *4*(1), 95-113. [In Persian] https://doi.org/10.22067/geo.v4i1.33957

Degirmendžić, J., & Wibig, J. (2007). Jet stream patterns over Europe in the period 1950–2001–classification and basic statistical properties. *Theoretical and Applied Climatology*, *88*, 149-167. https://doi.org/10.1007/s00704-006-0237-5

Dorostkar, H., Lashkari, H., & Mohammadi, Z. (2023). Synoptic analysis of the role of the subtropical jet stream in wet of south west of Iran. *Journal of Climate Research*, *1402*(54), 1-18. [In Persian] https://clima.irimo.ir/article_178894.html

Ebrahimi Nick, M. (2012). The role of the location of the subtropical and polar winds on the wet and dry year of southwestern Iran. (Master's thesis). Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University. [In Persian]

Fu, Y., Chen, F., Liu, G., Yang, Y., Yuan, R., Li, R., ... & Sun, L. (2016). Recent trends of summer convective and stratiform precipitation in mid-eastern China. *Scientific Reports*, *6*(1), 33044. https://doi.org/10.1038/srep33044

Horinouchi, T., & Hayashi, A. (2017). Meandering subtropical jet and precipitation over summertime East Asia and the northwestern Pacific. *Journal of the Atmospheric Sciences*, *74*(4), 1233-1247. https://doi.org/10.1175/JAS-D-16-0252.1

Hudson, R. D. (2012). Measurements of the movement of the jet streams at mid-latitudes, in the Northern and Southern Hemispheres, 1979 to 2010. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *12*(16), 7797-7808. https://doi.org/10.5194/acp-12-7797-2012

Hunt, K. M., & Zaz, S. N. (2023). Linking the North Atlantic Oscillation to winter precipitation over the Western Himalaya through disturbances of the subtropical jet. *Climate Dynamics*, *60*(7), 2389-2403. https://doi.org/10.1007/s00382-022-06450-7

Keikhosravi, G., Shakiba, A. R., & Hamidpour, P. (2022). Analysis of synoptic and thermodynamic patterns leading to extremely heavy rainfall and estimation of water area resulting from precipitation in Karkheh basin. *Geographical Studies of Coastal Areas Journal*, *1*(8), 83-100. [In Persian] https://journals.guilan.ac.ir/article_5572.html

Mohammadi, B., Alijani, B., & Omr Saleh, A. (2019). Climatology of Jet Streams in the Middle East. *Physical Geography Research*, *51*(2), 201-221. [In Persian] https://doi.org/10.22059/jphgr.2019.257049.1007216

Mohammadi, Z., & Lashkari, H. (2018). Effects of spatial movement of Arabia subtropical high pressure and subtropical Jet on synoptic and thermodynamic patterns of intense wet years in the south and south west Iran. *Physical Geography Research*, *50*(3), 491-509. [In Persian] https://doi.org/10.22059/jphgr.2018.249422.1007165

Roshan, G., & Ghanghermeh, A. (2015). The role of subtropical high pressure Jet Streams in controlling precipitation in Iran. *Geography and Environmental Planning*, *26*(3), 149-170. [In Persian] https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20085362.1394.26.3.10.3

Seidel, D. J., Fu, Q., Randel, W. J., & Reichler, T. J. (2008). Widening of the tropical belt in a changing climate. *Nature Geoscience*, *1*(1), 21-24. https://doi.org/10.1038/ngeo.2007.38

Sinaei, H., Saliqe, M., & Akbari, M. (2022). Extreme precipitation and the role of jet streams - Case study: Southwestern Iran. *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, *31*(121), 177-189. [In Persian] https://doi.org/10.22131/sepehr.2022.252777

Tan, X., Gan, T. Y., Chen, S., & Liu, B. (2019). Modeling distributional changes in winter precipitation of Canada using Bayesian spatiotemporal quantile regression subjected to different teleconnections. *Climate Dynamics*, *52*, 2105-2124. https://doi.org/10.1007/s00382-018-4241-0

Yokoyama, C., Takayabu, Y. N., & Horinouchi, T. (2017). Precipitation characteristics over East Asia in early summer: Effects of the subtropical jet and lower-tropospheric convective instability. *Journal of Climate*, *30*(20), 8127-8147. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0724.1

Zaki Zadeh, M. B., Saligheh, M., Nasserzad, M. H., & Akbari, M. (2018). Statistical analysis and synoptic most effective jet stream pattern creating the precipitation of Iran. *Journal of Natural Environmental Hazards*, *7*(15), 31-48. [In Persian] https://doi.org/10.22111/jneh.2017.3335

Zolotov, S. Y., Ippolitov, I. I., & Loginov, S. V. (2018). Characteristics of the subtropical jet stream over the North Atlantic from reanalysis data. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *211*(1), 012005. IOP Publishing. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/211/1/012005/meta